



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JAAKKO SEPPÄLÄ  
LoRa-teknologiaselvitys

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Mikko Salmenperä

## TIIVISTELMÄ

**JAAKKO SEPPÄLÄ:** LoRa-teknologiaselvitys

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 24 sivua

Toukokuu 2018

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Automaatiotekniikka

Tarkastaja: Mikko Salmenperä

Avainsanat: LoRa, LoRaWAN, LPWAN, langaton viestintä, IoT

LoRaWAN on vähätehoinen pitkän kantaman langaton verkkoteknologia, joka pohjautuu LoRa-kommunikaatioteknologiaan. Yhdessä tätä kokonaisuutta kutsutaan tässä työssä LoRa-teknologiaksi.

Tämä työ on kirjallisuusselvitys, jossa luodaan katsaus LoRa-teknologiaan. LoRa-tekniologiasta selvitetään yleinen toimintaperiaate, suorituskyky, keskeiset ominaisuudet ja selvitetään LoRa-järjestelmän vaatimuksia ja soveltuvuutta käytäntöön.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LANGATON VIESTINTÄ.....	2
2.1	Radiotekniikka .....	2
2.1.1	Toimintaperiaate .....	2
2.1.2	Teho ja kantama .....	3
2.1.3	Tiedonsiirto .....	4
2.1.4	Häiriöt .....	6
2.2	Verkkotekniikka .....	7
2.2.1	Verkkoviestintä .....	7
2.2.2	Verkkotopologia.....	8
2.2.3	Esineiden internet.....	10
3.	LORA.....	11
3.1	Toimintaperiaate.....	11
3.2	Suorituskyky.....	12
3.2.1	Tiedonsiirtonopeus.....	12
3.2.2	Kantama .....	13
3.3	Päätelaitteet .....	14
3.3.1	Pariston käyttöikä.....	14
3.4	Keskeiset ominaisuudet.....	15
4.	LORAWAN .....	16
4.1	Verkon rakenne .....	16
4.2	Toimintaperiaate.....	17
4.2.1	Yhdyskäytävien rooli .....	18
4.2.2	Palvelimen rooli .....	18
4.3	Keskeiset ominaisuudet.....	19
5.	LORA-TEKNOLOGIA ESIMERKKITAPAUUS .....	21
5.1	Tulokset.....	22
6.	YHTEENVETO .....	23
	LÄHTEET.....	24

## TERMIT JA LYHENTEET

CSS	Chirp Spread Spectrum, hajaspektrimodulaatioon perustuva digitaalinen modulaatiotekniikka, johon LoRa-laitteet perustuvat.
Chirp	Kaistanleveyden kattava taajuudenmuutos CSS-modulaatiossa.
DASH7	LoRa-teknologian kanssa kilpaileva LPWAN-verkko.
Yhdyskäytävä	Verkkotekniikassa oleva solmu, joka mahdollistaa liikennöinnin toiseen verkkoon.
IoT	Internet of Things eli esineiden internet tarkoittaa laitteiden ja koneiden verkottamista niin, että niitä voidaan ohjata tai sensoroida internet-verkon yli.
LAN	Local area network eli lähiverkko.
LoRa	Semtechin kehittämä ja patentoima langaton viestintäteknologia. LoRaWAN-verkon fyysinen kerros.
LoRa-teknologia	LoRa:n ja LoRaWAN:in muodostama kokonaisuus, josta sekavuuden välttämiseksi kutsutaan nimellä LoRa-teknologia.
LoRaWAN	LoRa Alliancen kehittämä vähätehoinen pitkän kantaman langaton verkkoteknologia eli LPWAN-verkko.
LPWAN	Low Power Wide Area Network, yleisnimitys vähätehoisille laajan peiton verkoille.
Modulaatio	Signaalin muokkaamista toisella signaalilla, radiotekniikassa tiedon siirto tapahtuu moduloimalla kantoaaltoa.
Sigfox	LoRa-teknologian kanssa kilpaileva LPWAN-verkko.
SNR	Signal to Noise Ratio eli signaali-kohinasuhde kuvaa vastaanotetun radiolähetysten ja taustakohinan tehojen suhdetta.

# 1. JOHDANTO

LoRa-teknologiaksi kutsutaan LoRaWAN-verkkoteknologian ja LoRa-viestintäteknologian muodostamaa kokonaisuutta. LoRa on Semtechin kehittämä vähätehoinen pitkän kantaman langaton viestintäteknologia. LoRaWAN on LoRa Alliancen kehittämä LoRa:an perustuva verkkoinfrastruktuuri ja viestintäprotokolla. LoRa-teknologia kuuluu LPWAN eli Low Power Wide Area Network -verkkoihin.

IoT-sovellukset ovat melko uusia innovaatioita ja niiltä puuttuu vielä kokonaan yleistyneet ja standardisoidut teknologiat. LoRa-teknologia on kehitetty ja suunniteltu ratkaisuksi hajautettuihin IoT-sovelluksiin. Teknologian suurimpana hyötynä muihin LPWAN-verkkoihin verrattuna on mainostettu sen erinomaista suorituskkyä ja paristoystävällistä virrankulutusta.

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena on tuottaa selvitys LoRa-teknologiasta. Tavoitteena on selvittää millä suunnitteluratkaisuilla on päästy yllämainittuihin hyötyihin ja mitä haittavaikutuksia näillä on ollut. Osatavoitteena on myös selvittää LoRa:a hyödyntävien järjestelmien vaatimuksia ja soveltuvuutta käytäntöön.

Ensimmäisessä luvussa käydään läpi langattoman viestinnän teoreettista taustaa ja toimintaperiaatteita. Luvussa selvitetään radio- ja tietoliikennetekniikan perusteet eli miten tietoa voidaan siirtää laitteelta toiselle langattomasti.

Seuraavissa luvuissa luodaan katsaus LoRa:an ja LoRaWAN:iin. LoRa:n yhteydessä selvitetään viestinnän toimintaperiaate, suorituskky, päätelaitteiden ominaisuudet ja teknologian keskeiset ominaisuudet. LoRaWAN-verkosta selvitetään rakennetta, toimintaperiaatetta ja keskeisiä ominaisuuksia.

Viimeisessä luvussa tutustutaan lyhyesti erääseen tutkimukseen LoRa-teknologian esimerkkitapauksesta kukkateollisuudessa.

## 2. LANGATON VIESTINTÄ

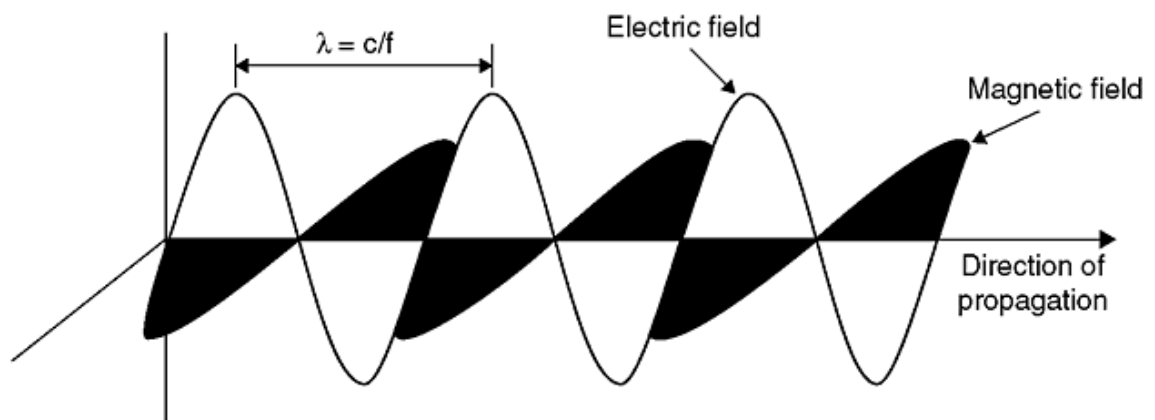
LoRaWAN-verkon tietoliikenne perustuu langattomaan verkkoviestintään [1]. LoRa-teknologioiden ymmärtämisen kannalta on hyvä selvittää ensin langattoman viestinnän ja tietoliikennetekniikan perusteet. Tämä osuus toimii johdatuksena aiheeseen selittäen lyhyesti osa-alueiden perusteita ja taustalla olevaa teoriaa.

### 2.1 Radiotekniikka

Radiotekniikka mahdollistaa informaation siirtämisen langattomasti sähkömagneettisten aaltojen avulla. Yksinkertaiseen radiolaitteistoon kuuluvat lähetin, vastaanotin ja 2 antenia. [2]

#### 2.1.1 Toimintaperiaate

Maxwell osoitti 1800-luvulla, että mikä tahansa johde (esimerkiksi antenni) tuottaa vaihtelevan magneettikentän ympärilleen, kun siihen syötetään vaihtovirtaa. Vaihteleva magneettikenttä synnyttää vaihtelevan sähkökentän, joka taas synnyttää magneettikentän. Vaihtelut synnyttävät sinimuotoisen etenevän sähkömagneettisen aallon, jonka olemus on havainnollistettu kuvassa 1. [2]



**Kuva 1.** Sähkömagneettinen aalto [2, Figure 2.1.].

Radiotekniikassa käytettäviä sähkömagneettisia aaltoja kutsutaan radioaalloiksi. Radioaallolla on taajuus  $f$ , aallonpituus  $\lambda$ , ja se etenee valonnopeudella  $c$ . Kuvan 1 mukaisesti aallonpituus ja taajuus riippuvat toisistaan yhteydellä

$$\lambda = c/f. \quad (1)$$

Yleensä mainitaankin vain aallon taajuus, koska se riippuu vain lähetystaajuudesta. Aallonpituus ja nopeus vaihtelevat väliaineesta riippuen kaavan (1) mukaisesti. Radioaaltojen taajuudet ovat 3 kHz – 300 GHz. Taajuuden lisäksi toinen kiinnostava aallon ominaisuus on amplitudi, joka riippuu suoraan aallon intensiteetistä eli sen energiasta. [2]

Radioaalto synnyttää vastaanottimen antennissa vaihtovirran, kun sähkömagneettinen aalto on vuorovaikutuksessa antennin kanssa. Nyt vastaanotin voi tulkita lähetetyn signaalin syntyvästä virrasta. [2]

### 2.1.2 Teho ja kantama

Radioaaltoja muodostetaan lähettimessä lähetysteholla  $P_T$ . Kun signaali vastaanotetaan, saadaan vastaanottoteho  $P_R$ , joka riippuu vastaanottavan antennin ympärillä olevasta energiatiheydestä  $D$ . Radioantennin ympärillä oleva energiatiheys on

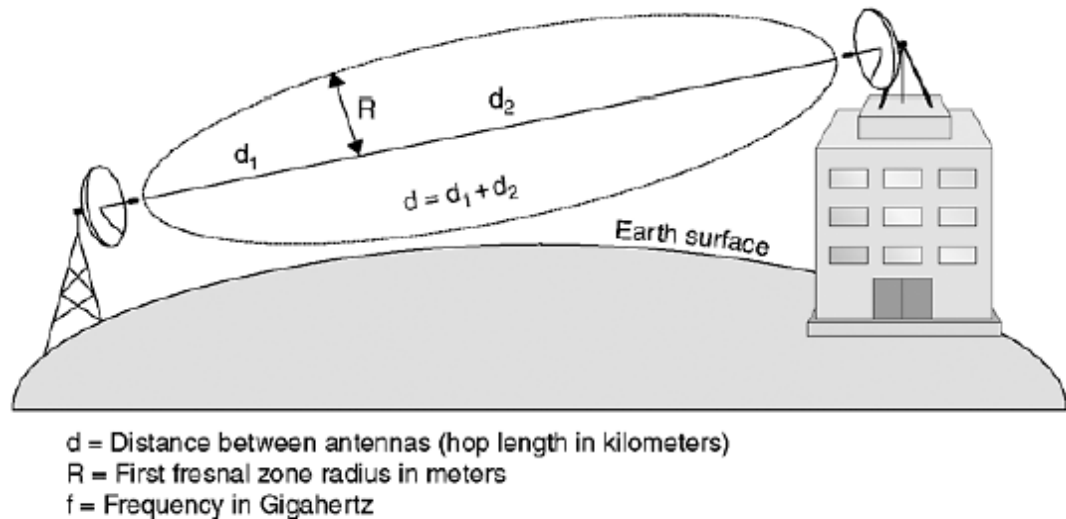
$$D = \frac{P_T G}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

missä  $G$  on antennin vahvistus ja  $R$  on antennien välinen etäisyys [3]. Kun antennin vahvistus  $G$  on 1, esimerkiksi dipoliantennilla, on energiavuo pallon muotoinen ja energiatiheys on vakio samalla etäisyydellä. Esimerkiksi lautasantenneilla voidaan suunnata energiavuota tiettyyn suuntaan, jolloin  $G > 1$  eli se toimii korjauskertoimena. Antennin vahvistus riippuu sen rakenteesta. [2]

Kaavan (2) mukaisesti vastaanottoteho on suoraan verrannollinen lähetystehon ja antennin vahvistuksen tuloon ja kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Etäisyys onkin tärkein vastaanottotehoon vaikuttava tekijä.

Lähetysteho on aina huomattavasti suurempi kuin vastaanottoteho. Tämä tehohäviö riippuu yllä mainitun mukaisesti lähetysetäisyydestä. Vastaanotetun signaalin vahvuus arvioidaan sen SNR:stä eli signaali-kohinasuhteesta. Kun vastaanottoteho on riittävän pieni, signaalia ei pystytä erottamaan taustakohinasta ja informaatiota ei voida siirtää [2].

Yllä mainitut johtopäätökset pätevät silloin, kun antennilla on suora näköyhteys eli antennien väliin muodostuva Fresnelin alue on tyhjä kuvan 2 mukaisesti. Kun Fresnelin alueessa on esteitä tai väliaineena ei olekaan tyhjiö, vastaanottoteho vaihtelee suuresti [3]. Kantamaan vaikuttaa siis lähetystehon, antennin ja etäisyyden lisäksi myös mahdolliset häiriöt, joita eritellään alaluvussa 2.1.4.



**Kuva 2.** suora näköyhteys ja Fresnelin alue [2, Figure 2.8.].

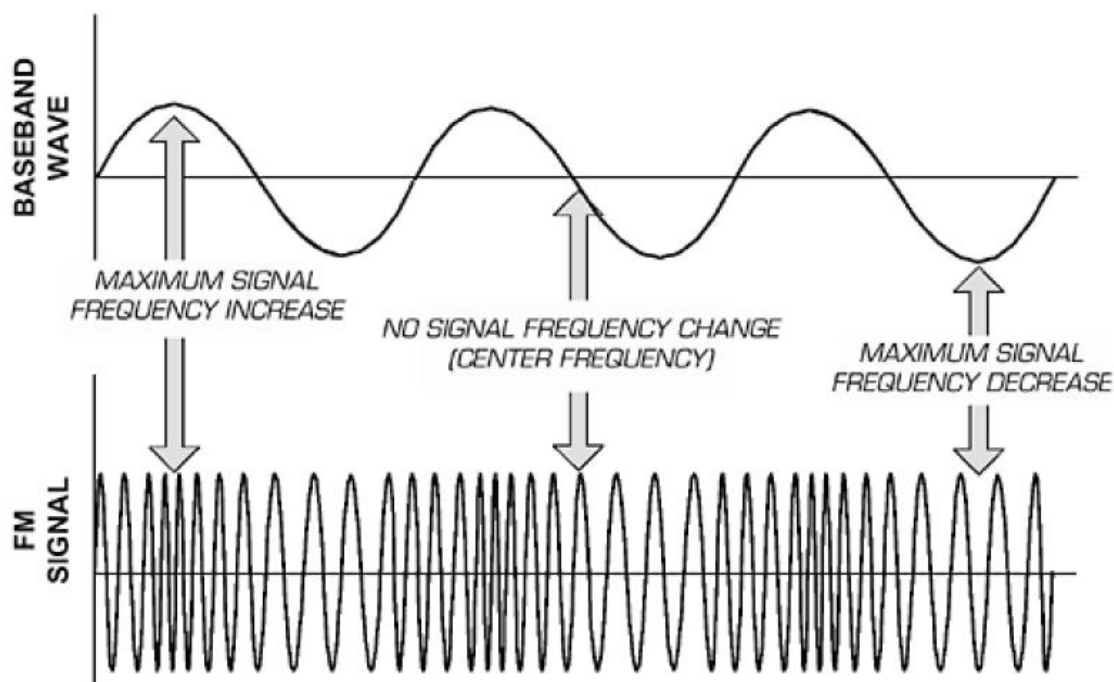
### 2.1.3 Tiedonsiirto

Radiotekniikalla voidaan langattomasti siirtää tietoa sekä analogisesti että digitaalisesti [4]. Koska LoRa-teknologia siirtää tietoa digitaalisesti, tässä työssä keskitytään erityisesti digitaalisiin tiedonsiirron menetelmiin. Digitaalisessa tiedonsiirrossa erilaisia menetelmiä on runsaasti, mutta ne perustuvat tässä osiossa esitettäviin periaatteisiin.

Kun laitteiden välille on saatu radioyhteys, voidaan radiokantoaaltoa muokata lähetettäessä niin, että aallon muotoon saadaan ujutettua informaatiota. Tätä kutsutaan modulaatioksi. Toinen signaali voi olla analoginen signaali tai digitaalista dataa. Kun saatu kantosignaali vastaanotetaan, voidaan kantosignaalista erottaa informaation sisältävä signaali. Tätä kutsutaan demodulaatioksi. [4]

Sekä laitteistoltaan että toiminnallisuudeltaan yksinkertaisimpia modulaatiotekniikoita on AM ja FM -modulaatio. AM (Amplitude Modulation) tarkoittaa kanta-aallon amplitudin muokkaamista. FM:ssä (Frequency Modulation) taas muokataan kanta-aallon taajuutta. Molemmissa tekniikoissa siirrettävä signaali moduloidaan yksinkertaisesti kanta-aallon tietyn ominaisuuden vaihteluun. Kuvassa 3 on havainnollistettu FM-tekniikalla siirrettävän signaalin vaikutusta kanta-aaltoon. [4]



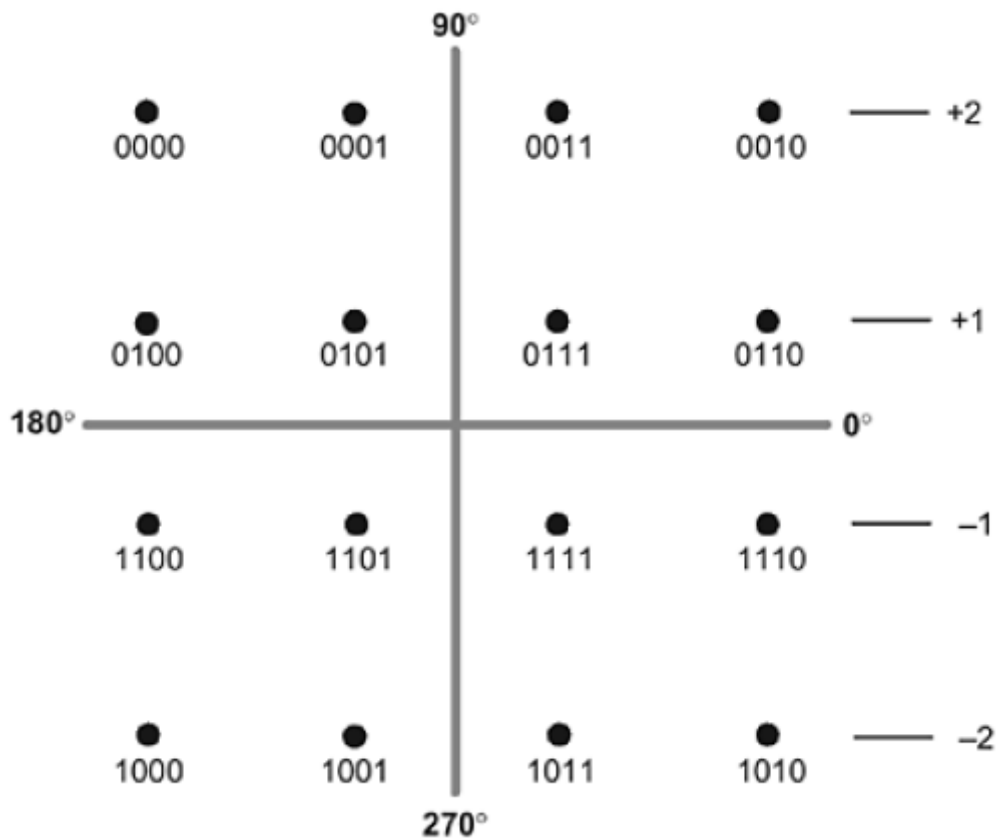


**Kuva 3.** FM-modulaatiossa välitetyn signaalin (BASEBAND) muutokset kantoaaltoon (FM) [4, Figure 2.11.].

Kolmas kantoaallon ominaisuus, jota voidaan manipuloida modulaatiolla, on kantoaallon vaihe. Vaihemodulaatiota kutsutaan lyhenteellä PM (Phase Modulation). Vaihemodulaatiota voidaan käyttää myös analogisella signaalilla, mutta sen tehokkuus näkyy vasta digitaalisessa tiedonsiirrossa. [4]

Digitaaliset tiedonsiirtotavat muokkaavat kantoaaltoa, niin että tietty muutos tarkoittaa aina tiettyä bittijärjestelyä. Digitaaliset tiedonsiirrot voivat käyttää AM, FM tai PM -tekniikoita tai näiden yhdistelmiä. Esimerkiksi yleisin digitaalisen modulaatiotekniikka QAM (Quadrature Amplitude Modulation) muuttaa kantoaallon amplitudia ja vaihetta. Esimerkiksi 3-bittisellä QAM-modulaatiolla saadaan 16 diskreettiä vaihe- ja amplituditilaa signaalille, jotka on havainnollistettu kuvassa 4. [4]

Mitä enemmän tiloja on, sitä enemmän bittejä voidaan siirtää samassa ajassa. Tilojen määrän kasvaessa tilat sijoittuvat lähemmäksi toisiaan. Tällöin niitä on vaikeampi tulkita kohinaisesta signaalista, jolloin tiedonsiirron kantama pienenee. [4]



**Kuva 4.** 16-QAM vaihe- ja amplituditilat. Osoittimen pituus on amplitudi ja vaihe on kulma [4, Figure 2.33.].

### 2.1.4 Häiriöt

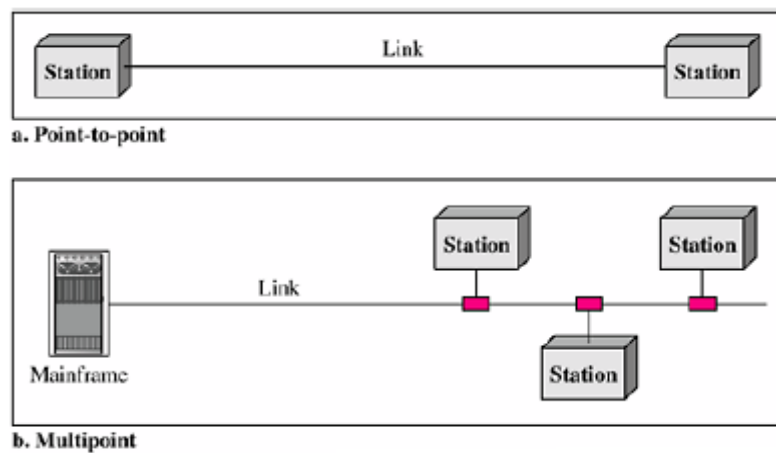
Langattoman viestinnän toimivuuteen ja kantamaan vaikuttavat myös erilaiset häiriötekijät. Käytännön sovelluksissa teoreettisella kantamalla ei ole mitään merkitystä, jos signaalia ei saada tulkittua häiriöiden takia.

Jos signaali on niin heikko, että sitä ei pystytä erottamaan häiriökohinasta, ei tietoa voida siirtää. Signaali voi vuorovaikuttaa ympäristön kanssa monella eri tapaa. Sähkömagneettinen aalto peilautuu esteiden pinnasta ja taipuu maapallon ilmakehässä aiheuttaen häiriösignaaleja. Lyhyellä kantamalla erityisesti Fresnelin alueiden reunalla olevat tasaiset pinnat ovat suuri häiriölähde. [3]

Alkuperäisestä aallosta peilautuneet tai diffraktoituneet aallot interferoivat lähetetyn radiosignaalin kanssa, ja lähetyksen tulkitseminen vaikeutuu. Häiriöitä voi aiheuttaa myös samalla taajuudella tai kanavalla oleva toinen lähetys, jolloin kumpaakaan lähetystä ei voida kuunnella. Analogisessa tiedonsiirrossa häiriöt näkyvät kohinana ja digitaalisessa väärinä bitteinä. [3]

## 2.2 Verkkotekniikka

Verkkotekniikalla tarkoitetaan informaation välittämisessä käytettävää laiteinfrastruktuuria. Verkoksi kutsutaan 2 tai useampaa laitetta, joilla on tietoliikenneyhteys. Yhteys voi olla suora eli Point-to-point-yhteys, jolloin laitteilla on oma suora yhteys toisiinsa. Multipoint-yhteydessä samaa fyysistä yhteyttä voi käyttää monta eri laitetta eli yhteydet ovat jaettuja. Kuvassa 5 esitettynä yksinkertainen Point-to-point-verkko ja Multipoint-verkko. [5]



**Kuva 5.** Yhteystyypit: Point-to-point ja Multipoint [5, Figure 1.3.].

Point-to-point-verkko takaa jokaiselle laitteelle oman suoran yhteyden toisiin laitteisiin. Tällöin tietoliikenteeseen ei muodostu pullonkauloja, mutta yhteyksien määrä on suuri. Multipoint-verkoissa yhteyksien määrää vähennetään käyttämällä samoja yhteyksiä monissa laitteiden välisissä reiteissä. Tällöin voi muodostua verkkoon pullonkauloja ja yhden yhteyden katkeamisella voi olla suuria vaikutuksia verkon toimintakykyyn. [5]

### 2.2.1 Verkkoviestintä

Laitteiden välistä tiedonsiirtoa kutsutaan viestimiseksi. Verkkoviestintään tarvitaan 5 osaa: viesti, lähettäjä, vastaanottaja, välittäjä ja protokolla. Viestillä tarkoitetaan lähetettävää informaatiota, esimerkiksi tekstiä, numeroita, audiota ja videota. Lähettäjä on laite, joka on viestin lähettänyt. Vastaanottaja ottaa viestin vastaan ja käsittelee sen informaation. Välittäjäksi kutsutaan viestin fyysistä reittiä laitteelta toiselle, esimerkiksi parikaapeli, lasikuitukaapeli tai radioaalto. Protokolla on säännöt, jotka ovat laitteiden välinen sopimus siitä, miten viestejä lähetetään ja käsitellään. [5]

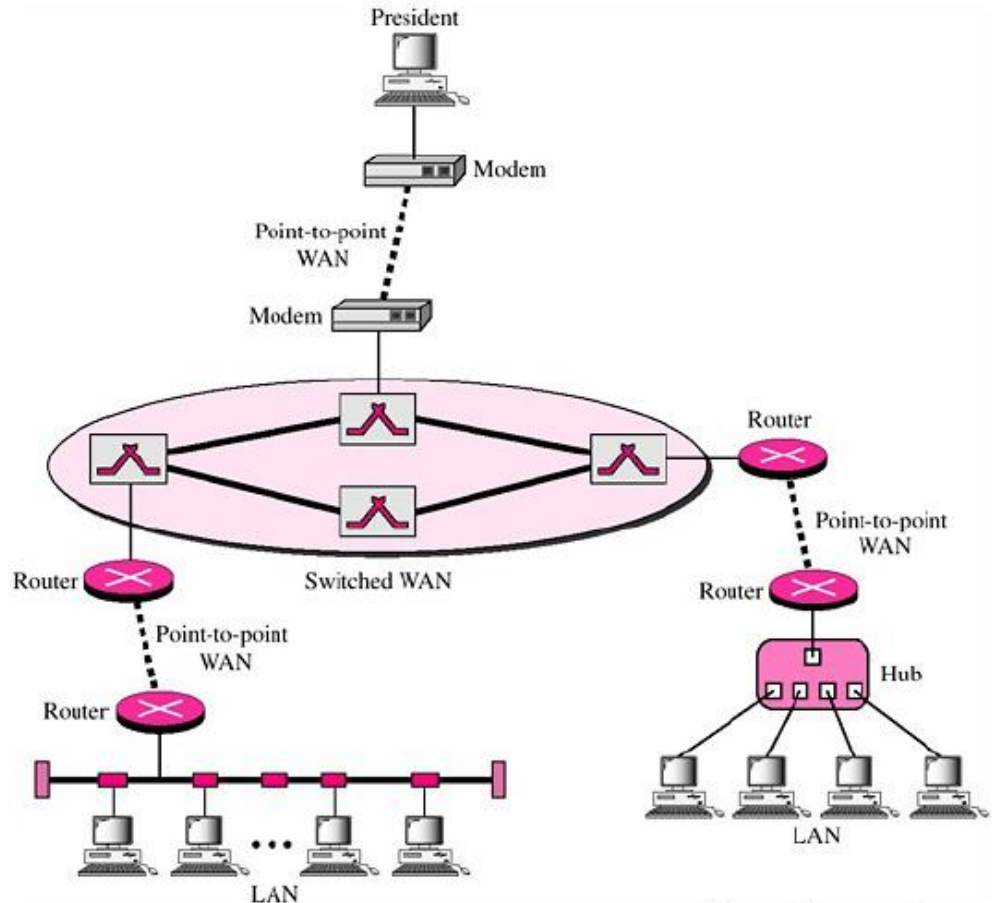
Viestintää kuvataan yleensä kerroksittain. Päällimmäisenä on käyttäjän käyttämä ohjelma ja alimmaisena on fyysinen kerros. Fyysinen kerros hoitaa varsinaisen bittien siirron laitteelta toiselle. Kerroksilla on oma protokollansa, jolla käytetään alemman kerroksen protokollaa, aina fyysiseen kerrokseen asti. Protokollaan kuuluu sopimus siitä mitä ja miten dataa siirretään ja käsitellään.

Protokollan osiin kuuluvat syntaksi, semantiikka ja ajoitus. Syntaksi määrää tiedonsiirron bittirakennetta ja eri informaation järjestystä viestissä. Esimerkiksi yksinkertainen protokolla voisi määrätä, että ensimmäiset 8 bittiä ovat lähettäjän osoite, seuraavat 8 bittiä vastaanottajan osoite ja loput bitit ovat siirrettävä data. Semantiikka määrää miten tietty bittirakenne tulkitaan ja mitä tulkinnan perusteella tehdään. Ajoitus tarkoittaa protokolliasta kahta asiaa: milloin data lähetetään ja miten nopeasti. [5]

## **2.2.2 Verkkotopologia**

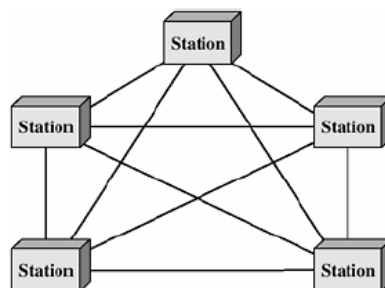
Verkkotopologialla tarkoitetaan verkon fyysistä rakennetta. Kaksi yhteydessä olevaa laitetta muodostavat yhteyden. Kaksi tai useampi yhteyttä muodostavat topologian. Verkkojen fyysisessä rakenteessa on useasti muitakin laitteita päätelaitteiden lisäksi, kuten kytkimiä, siltoja, keskittimiä ja reitittimiä. Tämän laitteiston tarkoitus on kuljettaa päätelaitteiden viestit toisille päätelaitteille. Topologiassa jokaista yhteyden välissä olevaa laitetta kutsutaan solmuksi. [5]

Yksinkertaisia verkkoteknisiä ratkaisuja kuvaa perusverkkotopologiat, joita on seuraavanlaisia: Mesh, tähti, väylä ja rengas. Monimutkaisemmat verkot ovat melkein aina näiden perustapausten yhdistelmiä. Yhdistelmäverkkojen rakenteita kuvaa hybriditopologia. Kuvassa 6 on esitetty verkon laitteita ja erilaisista rakenteista muodostuva kokonaisuus. [5]



**Kuva 6.** Monimuotoisen verkon laitteita ja rakenteita. [5, Figure 1.12.]

Mesh-topologia on point-to-point topologia ja se tarkoittaa, että verkon jokaisella päätelaitteella on suora ja oma yhteys jokaiseen verkon päätelaitteeseen. Tiedonsiirtämiseen ei tällöin tarvita muita laitteita ja yhteyksissä ei muodostu pullonkauloja. Haittapuolia on se, että  $n$ -laitteisen verkon muodostamiseen tarvitaan jokaiseen päätelaitteeseen  $n-1$  yhteyttä eli ratkaisu on tehokas vain pienillä tai langattomilla verkoilla. Rakenne havainnollistettu kuvassa 7. [5]



**Kuva 7.** Mesh-topologia [5, Figure 1.5.].

Tähtitopologia tarkoittaa, että kaikki laitteet ovat yhteydessä tähteen eli keskeiseen solmuun, joka käytännön toteutuksissa on keskitin tai reititin. Tähtiverkko vaatii keskittimen, mutta se on helppo toteuttaa, diagnosoida virheistä ja yhteyksien määrä on vähäinen: vain jokaisen päätelaitteen ja keskittimen välillä on yhteys. Rakenne kuvassa 6 oikeassa alareunassa. Rakenteen mukaisesti yhteydet ovat jaettuja eli topologia on Multipoint-tyyppinen. [5]

Väylätopologia on Multipoint-topologia ja se tarkoittaa, että kaikki laitteet ovat suoraan yhteydessä väylään. Tähän rakenteeseen ei tarvita erillisiä laitteita, yhteyksiä on vähän ja se on helppo ottaa käyttöön. Haittapuolista isoin on se, että yhteyden katkeaminen hajottaa verkon useamman päätelaitteen osalta. Rakenne kuvassa 6 vasemmassa alareunassa. [5]

### **2.2.3 Esineiden internet**

Verkkoja voidaan yhdistää toisiinsa, jolloin saadaan aina rakenteeltaan ja laitteiltaan monimutkaisempia verkkoja. Laajemmat ja monimutkaisemmat verkot helpottavat tiedon siirtoa ja tietojärjestelmien yhdistämistä. Esimerkkinä internet, jonka avulla voidaan viestiä ja siirtää tietoa maailmanlaajuisesti.

Nykyään verkkotekniikkaa kehitetään erityisesti esineiden internettiä varten. IoT:llä (Internet of Things) eli esineiden internetillä tarkoitetaan laitteiden ja koneiden verkottamista niin, että niitä voidaan ohjata tai sensoroida internet-verkon yli. Yhdistettäviä esineitä voi olla paljon ja yleensä niiden tarvitse olla langattomia ja paristokäyttöisiä. Tähän sovellusalueelle kehitettäviä verkkoja kutsutaan LPWAN-verkoiksi (Low Power Wide Area Network). Näitä verkkoja on esimerkiksi LoRaWAN, Sigfox ja DASH7. [6]

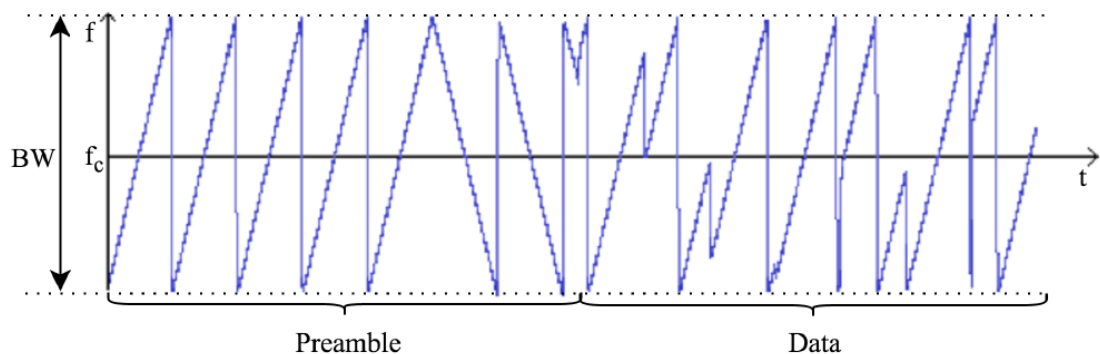
### 3. LORA

LoRa on LoRa-teknologian fyysinen kerros. Se toteuttaa LoRa-järjestelmien tiedonsiirron laitteelta toiselle eli lähettää ja vastaanottaa radiolähetyksiä. LoRa on Semtechin kehittämä ja patentoima kaupallinen langaton viestintäteknologia, joka mahdollistaa langattoman pitkän kantaman yhteyden energiatehokkaasti. Tähän teknologiaan kuuluvat LoRa:n lähettimet, vastaanottimet ja modulaatiotekniikka. [1]

LoRa-päätelaitteet ovat langattomia ja ne on suunniteltu käytettäväksi ilman kiinteää yhteyttä. LoRa-laitteet saavat käyttöenergiansa paristoista, eli niiden tärkeimpänä tavoitteena on kuluttaa mahdollisimman vähän energiaa. Paristot voivat kestää päätelaitteissa jopa vuosia. [1] Sovelluksesta riippuen päätelaitteita on erilaisia, mutta tässä luvussa käsitellään päätelaitetta vain tiedonsiirron näkökulmasta eli lähettimen ja vastaanottimen yhdistelmänä.

#### 3.1 Toimintaperiaate

LoRa siirtää tietoa digitaalisesti ja tiedonsiirto perustuu radioaallon LoRa-modulaation, joka perustuu CSS-modulaatioon (Chirp Spread Spectrum). Eli LoRa-lähetyksessä lähettyksen informaatio on koodattu lähetyksen taajuuden vaihteluun, jota kutsutaan chirpiksi. Kuvassa 8 on esitetty esimerkki LoRa-lähetyksen signaalista. [6]



**Kuva 8.** LoRa-laitteen lähettämä signaalin taajuuden vaihtelu [6, Figure 2.].

Kuvan 8 mukaisesti LoRa:n tiedonsiirto tapahtuu kasvattamalla ja pudottamalla kanta-aallon taajutta. Taajuudenvaihtelun epäjatkuvuus on se ominaisuus mihin tieto koodataan. LoRa-lähetykselle on ominaista eri tiedonsiirtonopeudet. Tiedonsiirtonopeus vaihtelee muutamasta parametreista riippuen. LoRa-lähetys on parametrisoitu kolmen muuttujan suhteen:  $BW$  (Bandwidth) eli kaistanleveys,  $SF$  (Spreading Factor) ja  $CR$  (Code Rate). [6]

Kaistanleveys,  $BW$  eli Bandwidth määrää kuinka paljon taajuus voi muuttua. LoRa:n käytössä olevia kaistanleveyksiä on 125, 250 ja 500 kHz. Kaistanleveys on tärkein modulaation vaikuttava parametri. [6]

$SF$  eli Spreading Factor määrää kuinka tiheään informaatio on koodattu kantoaaltoon. Tarkemmin määriteltynä  $SF$  on kaksikantainen logaritmi chirppien lukumäärästä per symboli. LoRa:ssa jokaisessa symbolissa on  $2^{SF}$  chirppiä ja jokainen symboli koodaa  $SF$  määrän bittejä. LoRa:ssa on käytössä  $SF$ :lle arvoja väliltä 7-12 [6]

Spreading Factor vaikuttaa vahvasti signaalin tulkintaherkkyyteen ja sitä kautta kantamaan. Isommalla arvoilla heikompaakin signaalia saadaan tulkittua. Taulukossa 1 on kuvattuna LoRa-lähetyksen antennien välisiä

$CR$  eli Code Rate on LoRa:ssa osamäärä  $4/(4+n)$ , missä  $n$  on kokonaisluku väliltä 1-4.  $CR$  liittyy LoRa:n lähetyksen virheiden korjaamiseen. Pienempi  $CR$  kasvattaa lähetyksen häiriönsietokykyä, mutta pienentää tiedonsiirtonopeutta. Lähetyksen häiriönsietokykyä kasvattamalla voidaan myös käyttää halvempia ja epätarkempia vastaanottimia, jolloin päätelaitteiden kustannukset putoavat huomattavasti. [6]

## 3.2 Suorituskyky

Langattomassa tiedonsiirrossa merkittävimmät suorituskykymittarit ovat tiedonsiirron nopeus ja kantama. Yleisenä muistisääntönä: toista kun kasvattaa niin toinen väistämättä laskee. LoRa:n myyntivaltteina on parametrisoinnista johtuva vaihteleva tiedonsiirron nopeus. Lyhyitä matkoja voidaan lähettää suuremmalla nopeudella, mutta hitaammalla tiedonsiirrolla saavutetaan pidempi kantama [1].

### 3.2.1 Tiedonsiirtonopeus

LoRa-modulaatiolla tiedonsiirtonopeus vaihtelee välillä 0,25 - 22 kbps [7]. Lyhyen kantaman langattomiin LAN verkkoihin, kuten WiFi ja Bluetooth, LoRa:lla on erittäin surkea tiedonsiirtonopeus. Muihin LPWAN verkkoihin vertaillen LoRa on vähintäänkin yhtä suorituskykyinen: esimerkiksi Sigfox:in tiedonsiirtonopeus on parhaimmillaan 100 bps ja DASH7:n on 167 kbps [6].

LoRa:n tiedonsiirtonopeus vaihtelee lähetyksen koodaamisessa käytössä olevista parametreista. Tiedonsiirtonopeus  $R_b$  voidaan laskea LoRa-lähetykselle seuraavalla kaavalla:

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} CR, \quad (3)$$

missä  $SF$  Spreading Factor,  $BW$  Bandwidth ja  $CR$  Code Rate. [6]



Esimerkkilähetyksen parametrit voivat olla  $BW = 125$  kHz,  $SF = 7$ ,  $CR = 4/5$ . Tällöin kaavan (3) mukaisesti saadaan tiedonsiirtonopeudeksi 5,5 kbps

### 3.2.2 Kantama

Kuten alaluvussa 2.1.4 todettiin, radioviestinnän kantamaa rajoittaa kaikenlaiset häiriölähteet. Lähetystehon lisäksi myös

LoRa:lle suoritetuissa kantamatutkimuksissa saatiin hyvinkin vaihtelevia tuloksia riippuen testauspaikasta [7] [6]. Kaupunkiympäristössä maksimikantama oli noin 7 km luokkaa ja avoimessa maastossa LoRa:lla saatiin jopa 19 km kantama. Tutkimuksessa kokeiltiin LoRa:n maksimikantamaa kuudella eri tiedonsiirtonopeudella (DR) kolmessa eri laisessa ympäristössä: Kaupunki (urban), lähiö (suburban) ja maaseutu (rural). Saadut tulokset on koottu taulukkoon 1. [7]

**Taulukko 1.** LoRa:n maksimikantamat (km) erilaisissa ympäristöissä ja eri tiedonsiirtonopeuksilla [7, Table 4.].

DR	Urban Scenario	Suburban Scenario	Rural Scenario
DR0	6,5	6,7	18,5
DR1	5,4	5,8	13,7
DR2	4,5	5,7	11,6
DR3	4,4	5,3	11,5
DR4	4	5,0	10,3
DR5	2,8	5,5	9,6

Yhteydet toimivat parhaiten maaseudulla, jossa häiriötekijöitä on vähän. Kaupunkiin siirryttäessä maksimikantamat putoavat reippaasti. Tiedonsiirtonopeuden kasvaessa maksimikantamat putoavat myös huomattavasti.

Sigfox:iin verrattuna LoRan kantama on kohtuu hyvä: Sigfox saavuttaa kaupunkiolosuhteissa maksimikantaman 3-10 km ja maaseudulla 30-50 km. Tiedonsiirrossa nopeammalla DASH7:lla kantama on LoRa:n kantamaan verrattuna huono: parhaimmassa tapauksessa 2 km. [6]

### 3.3 Päätelaitteet

LoRa:n päätelaitteet ovat Semtechin kehittämää, langattomia ja paristokäyttöisiä. LoRa-päätelaitteet on suunniteltu ottavan point-to-point yhteyden verkon yhdyskäytäviin, eikä toisiin päätelaitteisiin. Tämä on hyvinkin mielenkiintoinen ratkaisu, joka lisää verkon kapasiteettia ja parantaa yksittäisen päätelaitteen energiatehokkuutta. [1]

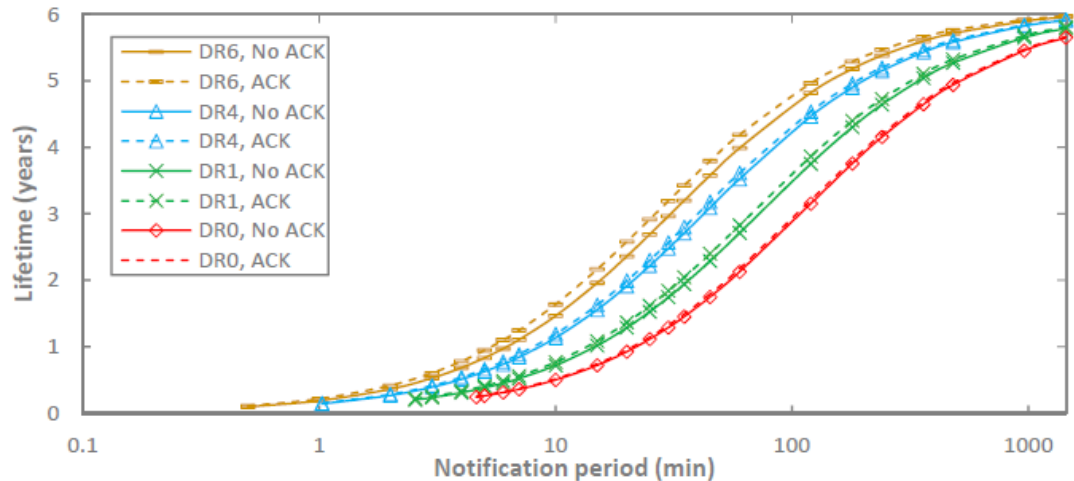
LoRa Alliance väittää LoRa-päätelaitteiden kestävän vuosia ilman paristojen vaihtoa. [1] LPWAN-verkkojen ideana on kuluttaa mahdollisimman vähän tehoa lähetykseen, mutta silti lähetyksen lähetyksen tai kuuntelu kuluttaa suurimman osan päätelaitteiden virrasta. [8]

LoRa:n päätelaitteet jaetaan niiden lähetyksen ja kuunteluominaisuuksien perusteella kolmeen eri luokkaan: A-luokan laitteet asetetaan lähettämään dataa tietyin väliajoin ja ne kuuntelevat vastauksia aina lähetyksen jälkeen tietyn aikaa. B-luokan laitteet toimivat kuin A-luokka, mutta lisäksi ne kuuntelevat lähetyksiä tietyin väliajoin. C-luokan laitteet kuuntelevat lähetyksiä jatkuvasti, pois lukien laitteiden oman lähetyksen aikana. [1]

LoRa-laitteet toimivat 433, 868 ja 915 MHz ISM-kaistoilla, riippuen käytettävästä alueesta. Näillä kaistoilla on myös rajoitettu päätelaitteen lähetystiheys 1 %:iin eli laite saa lähettää lähetyksiään vain 1 % ajasta [7]. Eli pelkästään paristonkulutus ei määrää lähetystiheyttä.

#### 3.3.1 Pariston käyttöikä

Casals et al. tutkivat vuonna 2017 A-luokan LoRa-päätelaitteiden virrankulutusta. Tutkimuksessa tutkittiin lähetystiheyden ja pariston käyttöiän suhdetta ja lähetyksuittausten vaikutusta pariston keston. Eräs tutkimuksen tuloksista on esitettyä kuvassa 9. Pariston kooksi oli oletettu 2400 mAh ja tutkimuksessa testattiin pariston käyttöikää eri tiedonsiirtonopeuksilla ja lukukuittaustiloilla. [8]



**Kuva 9.** Pariston käyttöikä lähetystiheyden funktiona [8, Figure 14.].

Lähetystiheyden lähestyessä 100 minuuttia saadaan kaikilla tiedonsiirtonopeuksilla mainospuheisiin yltävä yli kolmen vuoden käyttöikä paristolle. Toisaalta 10 minuutin kohdalla puolesta vuodesta puoleentoista vuoteen. A-luokan laitteet ovat LoRa-päätelaitteista energiatehokkaimpia, joten muiden luokan laitteiden kanssa käyttöiät ovat vielä lyhyempiä [8].

### 3.4 Keskeiset ominaisuudet

LoRa asettaa sitä käyttävälle järjestelmälle melko tiukkoja vaatimuksia. Yksittäiseltä päätelaitteelta kerättävä informaatio pitää olla hyvin tiivistä, jotta sitä voidaan siirtää tehokkaasti LoRa:n pienillä tiedonsiirtonopeuksilla. Koska LoRa:n päätelaitteet ovat paristokäyttöisiä, täytyy niiden sovelluskohteidenkin toiminnot olla vähävirtaisia.

Päätelaitteet ovat hyvin pienikuluksia, jolloin pärjätään pienemmällä paristokapasiteetilla. Näin säästetään yksittäisen päätelaitteen kuluissa. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että LoRa-modulaation vastaanottimet ja lähettimet ovat Semtechin yksinomaisuutta ja se näkyy varmasti hinnoissa.

Reaaliaikaisuusvaatimukselliset järjestelmät eivät myöskään kelpaa, sillä A ja B -luokien laitteiden kanssa kaksisuuntainen kommunikointi voi kestää jopa tunteja. Viiveitä saadaan kyllä pienennettyä tarvittaessa, mutta tämä taas kuluttaa enemmän virtaa.

Kantamansa puolesta LoRa:n käyttömahdollisuudet ovat hyvinkin laajat. Muutamalla LoRa-yhdyskäytävällä voidaan kattaa hyvinkin isoja alueita, myös paljon häiriöitä sisältävässä kaupunkiympäristössä.

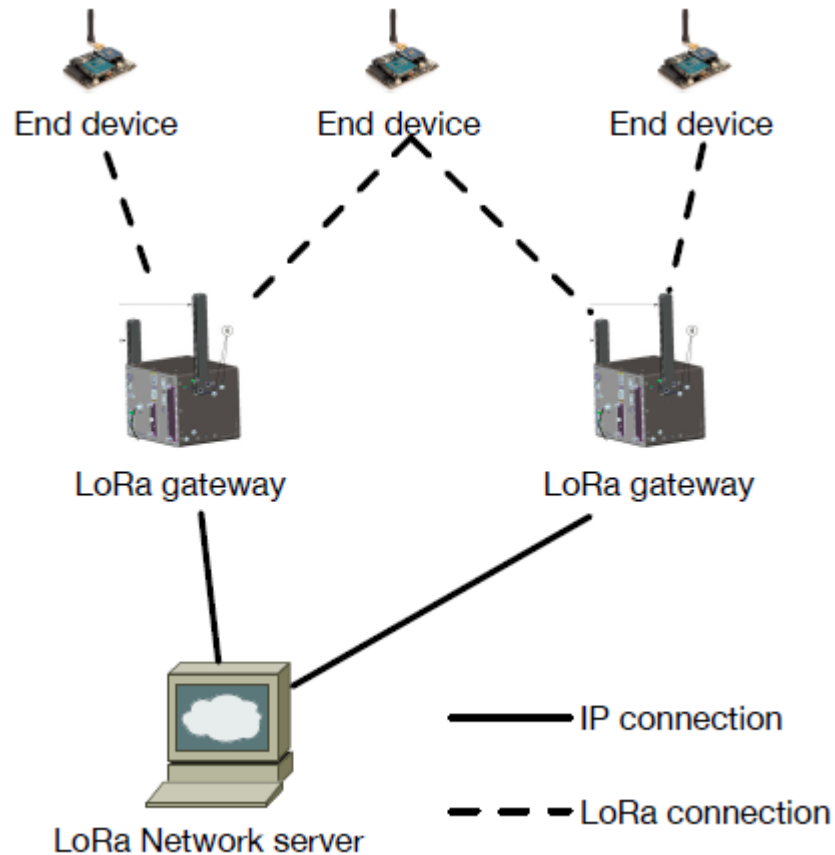
## 4. LORAWAN

LoRaWAN on LoRa Alliancen kehittämä verkkoinfrastruktuuri ja viestintäprotokolla. LoRa on Semtechin kaupallista omaisuutta, mutta LoRaWAN on avoin standardi. LoRa Alliance onkin eri yritysten muodostama yhdistys, jonka tavoitteena on kehittää IoT-verkkoihin sopiva avoin standardi. Jotta LoRa:n hyötyjä saadaan tehokkaasti käytettyä, täytyy verkkoinfrastruktuurin tukea kommunikaatioteknologiaa: LoRaWAN on LoRa:an räätälöity verkkoratkaisu. [1]

LoRa-teknologia on kehitetty erityisesti IoT-sovelluksia varten. Tämä asettaa verkkoinfrastruktuurille monenlaisia vaatimuksia. Päätelaitteita on paljon ja ne tuottavat paljon dataa eli verkon skaalautuvuus ja kapasiteetti täytyy olla riittävän hyviä. LoRaWAN:in perusideana on suurikapasiteettiset keskitetyt yhdyskäytävät, joihin LoRa-päätelaitteet ottavat yhteyttä LoRa-modulaatiolla [1].

### 4.1 Verkon rakenne

LoRaWAN tarvitsee toimiakseen kolmenlaisia laitteita: LoRa-päätelaitteita, LoRa-yhdyskäytäviä ja palvelimen. Laitteet muodostavat tähtien-tähti-topologian, joka on kaksikerroksinen tähtitopologia. [6] Palvelin on keskeinen solmu, johon on yhdistetty verkon yhdyskäytävät. Yhdyskäytävät taas toimivat keskeisinä solmuina verkon päätelaitteille. Laitteita ja rakennetta on havainnollistettu kuvassa 10 [6].



**Kuva 10.** LoRaWAN arkkitehtuuri [6, Figure 1.].

Monet LPWAN-verkot hyödyntävät Mesh-topologiaa, jolloin päätelaitteilla on Multi-point-yhteyksiä [1]. Näin saadaan kasvatettua kantamaa, mutta päätelaitteet joutuvat välittämään toistensa viestejä eteenpäin, jolloin pariston käyttöiät lyhenevät huomattavasti. LoRaWAN hyödyntää LoRa:n pitkää kantamaa käyttämällä yllä kuvattua rakennetta, jolloin päätelaitteet lähettävät ja vastaanottavat vain omia lähetyksiään.

## 4.2 Toimintaperiaate

Kuten aiemmin todettiin, päätelaitteet lähettävät tietoa yhdyskäytävälle asynkronisesti, joko tapahtumapohjaisesti tai sitten ajoitettuna. Päätelaitteet hyödyntävät LoRa:a kommunikoidessaan. Tässä kommunikaatiossa käytetään LoRaWAN-protokollaa, joka määrittää miten päätelaitteet kommunikoivat. LoRaWAN-protokolla mahdollistaa vaihtelevan tiedonsiirtonopeuden muuttamalla lähetyksen parametreja protokollan mukaisesti. [6]

LoRaWAN-protokollan mukaisesti päätelaitteiden lähettämässä paketissa ei ole ollenkaan osoitetta, jolla säästetään myös muutama bitti. Mikä vaan verkon yhdyskäytävä voi vastaanottaa lähetyksen. [6] Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että päätelaitteet voivat vapaasti liikkua yhdyskäytävien kantamien alueella. [1]

### 4.2.1 Yhdyskäytävien rooli

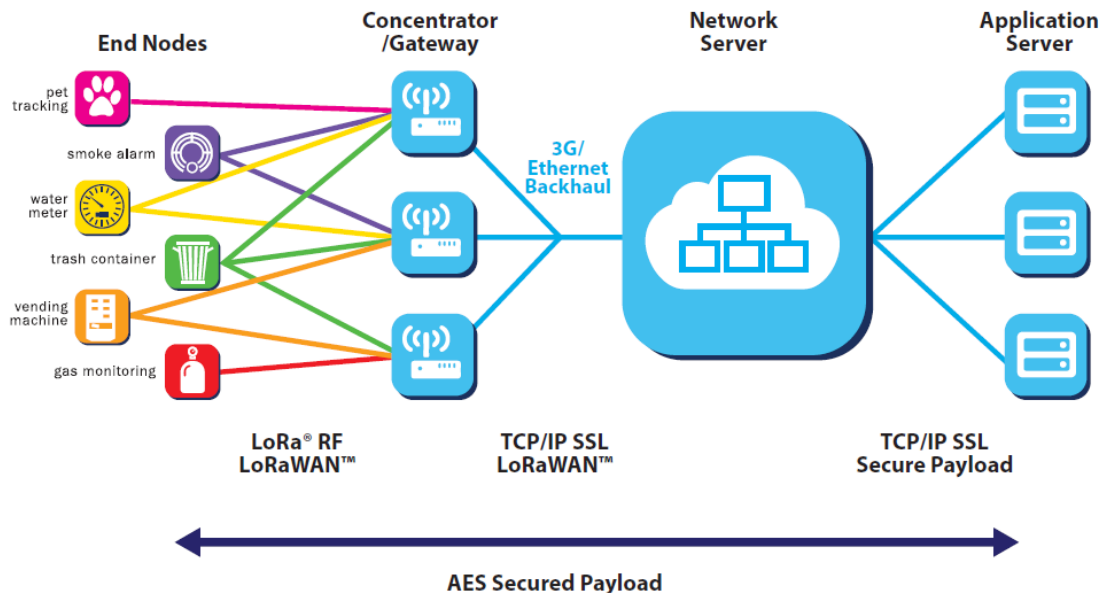
Yhdyskäytävien tehtävänä on siirtää vastaanotetut päätelaitteiden lähetykset keskuspalvelimelle. Verkon rakenteen mukaisesti yhdyskäytävillä on kantama-alueellaan monia päätelaitteita. Yhdyskäytävien täytyy olla suurikapasiteettisia: tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että yhdyskäytävien on oltava kiinteitä tukiasemia, joilla on palvelimeen 3G- tai ethernet-yhteys. [6] Prokollana on tässä kommunikaatiossa TCP/IP. [1]

Päätelaitteille päin yhdyskäytävät välittävät kuittauksia. Koska useampi yhdyskäytävä voi kuulla saman lähetyksen, yhdyskäytävät eivät itse kuittaa lähetyksiä. Kuittaukset muodostaa palvelin, joka lähettää ne yhdyskäytävälle. [6]

### 4.2.2 Palvelimen rooli

Palvelin toimii koko järjestelmän logiikkana. Sen tehtävänä on vastaanottaa ja prosessoida yhdyskäytäviltä paketteja. Koska yhdyskäytävät välittävät kaikki kuulemansa lähetykset eteenpäin, palvelimelle tulee osa paketeista moninkertaisena. Monikerrat poistetaan ja tarvittaessa palvelin lähettää yhdyskäytävälle kuittauksen. [6]

LoRaWAN:in on mainostettu kestävän miljoonia päätelaitteita. Kaikkien näiden päätelaitteiden lähetykset päätyvät palvelimen hoidettavaksi, joten palvelimella täytyy olla erinomainen tiedonkäsittelykapasiteetti. Varsinainen sovelluskohtainen tiedonkäsittely tapahtuu kuvan 11 mukaisesti muualla eli palvelimen tehtävänä on vielä välittää tiedot eteenpäin erillisille sovelluspalvelimille.



**Kuva 11.** LoRaWAN-verkon rakenne päätelaitteesta sovelluspalvelimelle [1, s. 8].

### 4.3 Keskeiset ominaisuudet

Yhtenä kiinnostavana verkon ominaisuutena on verkon turvallisuus. LoRa Alliance mainostaa LoRaWAN:in olevan hyvin suojattu erilaisilta hyökkäyksiltä [1]. Mutta, Tomasini et al. osoittivat, että LoRaWAN on altis monenlaisille hyökkäyksille [9]. Mikään järjestelmä ei ole täydellinen, mutta tämä rajaa pois kriittisen infrastruktuurin toimintavarmat järjestelmät pois sovelluskohteista. Toki myös suuret viiveet ja kaksisuuntaisen viestinnän kankeus niitä rajoittavat.

LoRaWAN:in verkon rakenne on hyvinkin yksinkertainen. Tämä helpottaa sovellusjärjestelmän suunnittelua. Päätelaitteiden sijoittaminen on hyvinkin vapaata, kunhan vain niillä on yhteys yhdyskäytävään. Yhdyskäytävien sijoittamisella on tarkempia vaatimuksia, kuten verkkovirran tarve ja suurikapasiteettinen tiedonsiirtöväylä. Yhdyskäytävät ovat tärkein osa LoRaWAN:in verkkoinfrastruktuuria. Niillä rakennetaan varsinainen verkon peitto, jossa päätelaitteet voivat liikkua vapaasti.

LoRaWAN on avoin standardi eli kuka tahansa voisi käyttää sitä sovelluksissaan. Lisää joustavuutta tuo myös kolmannen osapuolen tarjoamat LoRaWAN-verkot, kuten Suomessa Digitan IoT LoRaWAN-verkko [10]. Verkkoinfrastruktuurin voi siis ostaa palveluna, jolloin päästään helposti ja nopeasti soveltamaan teknologiaa käytännössä. Kuvassa 12 on esitetty Digitan verkon peittoa Etelä-Suomessa [10].



**Kuva 12.** Digitaalisen IoT LoRaWAN-verkon peitto Suomessa. Tummemmalla sinisellä kuvattu sisäkuuluvuusalueet. [10]



## 5. LORA-TEKNOLOGIA ESIMERKKITAPPAUS

Teollisuusympäristön IoT-järjestelmät ovat osa tulevaisuuden automaatiota ja auttavat teollisuuden tehokkuuden parantamisessa. Haxhibeqiri et al. tutkivat vuonna 2017 LoRa-teknologian soveltuvuutta sisätilakäyttöön teollisuusympäristössä [11]. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voiko LoRa-teknologiaa hyödyntää tehokkaasti teollisuusympäristössä [11].

Tutkimus suoritettiin Alankomaissa Royal FloRaHolland Auction Center:issä. Kyseessä on 250000 m<sup>2</sup> teollisuusalue, jossa varastoidaan kukkia. Ympäristö on hyvinkin dynaaminen, kukkia siirrellään päivittäin suuria määriä. Kukkia siirrellään suurilla kärryillä, jotka tekevät langattomasta viestinnästä haasteellista. Kuvassa 13 on otos testiympäristöstä. [11]



**Kuva 13.** Tutkimuksen testiympäristöä [11, Figure 1].

Tutkimuksessa yksi LoRa-yhdyskäytävä asennettiin 6 m korkeuteen sisätiloihin ja siihen otettiin yhteyttä yhdellä kukkakärryihin sijoitetulla päätelaitteella 1,7 m korkeudelta. Yhteystestejä otettiin kattavasti ympäri aluetta sekä sisätiloista että ulkoa. Testeissä käytettiin eri tiedonsiirtonopeuksia käyttämällä Spreading Factor:ina 7 ja 12:ta. [11]

LoRaWAN-verkon skaalautuvuutta arvioitiin tutkimuksessa simuloimalla. Tutkimuksen sovellusjärjestelmässä liikkuvat kääryt lähettävät dataa 5 minuutin välein ja paikallaan olevat kääryt tunnin välein. Simulaatiossa 25 % päätelaitteista lähetti dataa 5 minuutin välein ja 75 % tunnin välein. Lähetettävänä datana oli 20 tavua informaatiota. [11]

## 5.1 Tulokset

Yhdellä yhdyskäytävällä saatiin katettua koko 34000 m<sup>2</sup> sisätila käyttäen SF 7:ää. Sisätiloissa ei havaittu yhtään kadonneita paketteja lähetyksissä. Ulkoa otetuilla testeillä saatiin hitaammalla tiedonsiirtonopeudella maksimikantamaksi 400 m. [11]

Tähän sovellukseen yhden yhdyskäytävän LoRaWAN-verkon kapasiteetiksi määritettiin simuloimalla 6000 päätelaitetta. Tällöin pakettihävikki oli juuri alle 10 %. [11]

Kaiken kaikkiaan tutkimus oli LoRa-teknologian kannalta menestys. LoRa-teknologialla kelpaisi mainiosti toteuttaa näihin olosuhteisiin esimerkiksi IoT-mittausjärjestelmän.

## 6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tuottaa selvitys LoRa-teknologiasta ja siinä onnistuttiin hyvin. LoRa-teknologia on ainutlaatuinen teknologia ja sillä on potentiaalia olla osa montaa tulevaisuuden IoT-sovellusta tai jopa yleistä IoT-standardia. LoRa-teknologia on LPWAN-verkkokokonaisuus, joten sen käyttökohteilla on tiukkoja rajoitteita. Rajoitteiden puutteessa teknologian on kuitenkin hyvin joustava ominaisuuksiltaan ja erittäin pätevä käytännön sovelluksiin.

LoRa-teknologian hyviä puolia ovat energiatehokkuus, kantama ja joustavuus sekä päätelaitteissa, viestinnöissä että käyttöympäristöissä. Päätelaitteiden paristot kestävät käyttöä monia vuosia. Yhdellä tukiasemana toimivalla LoRa-yhdyskätävällä voidaan kattaa myös kaupunkikäytössä muutaman kilometrin säteisiä alueita. Kaupunkikäytössä LoRa-teknologialla on myös hyvä sisäkuuluvuus.

LoRa-teknologian LoRaWAN:in yksinkertainen verkkoarkkitehtuuri helpottaa myös järjestelmien käyttöönottoa ja suunnittelua. LoRaWAN-verkkojen kapasiteetti on tosi hyvä, jopa miljoonia päätelaitteita kattava. Lisäksi jo nyt on saatavilla myös kolmannen osapuolen LoRaWAN-verkkoja nopeaan järjestelmien testailuun ja kokeilemiseen.

LoRa-teknologian huonoja puolia ovat pieni tiedonsiirtonopeus, harva lähetystiheys, kaksisuuntaisen viestinnän vaikeus ja heikko tietoturva. Lähetyksen sisältämän informaation täytyy olla hyvin tiivistä, jotta se saadaan nopeasti lähetettyä paristoa kuluttamatta ja verkkoa tukkimatta. Kaksisuuntainen viestintä on mahdollista, mutta hyvin hidasta. Yhdessä harvan lähetystiheyden kanssa tämä rajaa reaaliaikaiset järjestelmät pois sovelluskohteista.

Nähtäväksi jää, mihin suuntaan LoRa-teknologia kehittyy tulevaisuudessa. Tällä hetkellä se näyttää vahvalta ehdokkaalta IoT-mittausjärjestelmien standarditeknologiaksi.

## LÄHTEET

- [1] Lora Alliance White Papers, Lora Alliance, web page. Available (accessed A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™): <https://www.lora-alliance.org/lorawan-white-papers>.
- [2] H. Lehpamer, Basics of Microwave Communications, in: Anonymous (ed.), Microwave Transmission Networks: Planning, Design, and Deployment, Second Edition, McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2010, pp. 1-67.
- [3] M. Davies, THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM, in: Anonymous (ed.), Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers, McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2003, pp. 1-10.
- [4] C.W. Sayre, Modulation, in: Anonymous (ed.), Complete Wireless Design, McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2001, pp. 1-46.
- [5] B.A. Forouzan, Introduction, in: Anonymous (ed.), Data Communications and Networking, Fourth Edition, McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2007, pp. 1-30.
- [6] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, T. Clausen, W.M. Townsley, A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things, Sensors; Basel, Vol. 16, Iss. 3, 2016, pp. 1-18.
- [7] R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Viñas, Maria-Dolores Cano, A.F. Skarmeta, Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions&nbsp;Sensors; Basel, Vol. 18, Iss. 3, 2018, pp. 1-20.
- [8] L. Casals, Bernat Mir, R. Vidal, C. Gomez, Modeling the Energy Performance of LoRaWAN, Sensors; Basel, Vol. 17, Iss. 10, 2017, pp. 1-31.
- [9] S. Tomasin, S. Zulian, L. Vangelista, Security Analysis of LoRaWAN Join Procedure for Internet of Things Networks, 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), IEEE, pp. 1-6.
- [10] Digita Oy IoT LoRaWAN-verkon peittokartta, Digita Oy, web page. Available (accessed Digitan IoT LoRaWAN-verkon peittokartta): [https://www.digita.fi/yri-tyksille/iot/iot\\_lorawan-verkon\\_peittokartta](https://www.digita.fi/yri-tyksille/iot/iot_lorawan-verkon_peittokartta).
- [11] J. Haxhibeqiri, A. Karaagac, F. Van den Abeele, W. Joseph, I. Moerman, J. Hoebeke, LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study, 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, pp. 1-8.